

پایش سلامت ساختمان‌های اسکلت فولادی موجود با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی به روش به‌روزرسانی مدل اجزای محدود

امیر زایری بغلانی نژاد^{۱*}، محمد شکراللهی^۱، موسی محمودی صاحبی^۲

۱- استادیار گروه سازه، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

۲- استاد گروه سازه و زلزله، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

*خوزستان، صندوق پستی ۶۴۶۱۵۳۳۴، a_zayeri@jsu.ac.ir

چکیده

اگرچه استفاده از اتصالات خورجینی در سازه‌های فولادی به دلیل محدودیت‌ها و اشکالات فنی در ایران تقریباً منسوخ شده است، ساختمان‌های با اهمیت بسیار در نقاط مختلف کشور وجود دارند که در گذشته با استفاده از این نوع اتصال ساخته شده‌اند. از آنجایی که مسئله تعمیر و نگهداری و پایش وضعیت سازه‌های موجود بر کسی پوشیده نیست، در این مقاله به موضوع شناسایی اطلاعات دینامیکی و پایش سلامت سازه‌های اسکلت فولادی با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی پرداخته شده است. مدل‌سازی اتصالات خورجینی در نرم‌افزارهای اجزای محدود، یکی از چالش‌هایی است که در این زمینه وجود دارد. در این پژوهش، ابتدا روشی برای مدل‌سازی اجزای محدود این نوع سازه‌ها پیشنهاد شده است. در گام بعدی، مدل اجزای محدود مذکور، با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از ارتعاشات دینامیکی سازه تحت بارهای محیطی به‌گونه‌ای کالیبره و به‌روزرسانی شده تا مدل به‌دست‌آمده، بیش‌ترین تطابق را با سازه واقعی داشته باشد. از مدل اجزای محدود به‌روزرسانی شده در موارد مختلفی از جمله، شناسایی آسیب پس از وقوع حوادث ناگهانی، بهینه‌سازی و تقویت سازه و پایش دوره‌ای سلامت آن می‌توان بهره جست. به‌منظور شرح و بررسی قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی، یک سازه سه طبقه واقعی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از انجام تست‌های ارتعاشی، مدل اجزای محدود سازه مذکور تهیه و به‌روزرسانی شد. تحلیل نتایج، حاکی از تطابق قابل قبول اطلاعات دینامیکی مدل مذکور با سازه واقعی است.

واژگان کلیدی

اتصال نیمه‌صلب خورجینی، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، تست ارتعاشی، نویز

Health monitoring of existing steel frame buildings with semi-rigid saddle connections using finite element model updating method

A. Zayeri Baghlani Nejad, M. Shokrollahi, M. Mahmoudi Sahebi

Abstract

Although the use of saddle connections in steel structures has largely declined in Iran due to technical limitations, many significant buildings across the country were constructed using this method in the past. Ensuring the maintenance and structural health monitoring of these aging frameworks remains a critical concern. This study focuses on identifying dynamic characteristics and evaluating the integrity of steel frame structures with semi-rigid truss connections. One of the key challenges in this area is accurately modeling truss connections in finite element software. To address this, we propose a refined approach for finite element modeling of such structures. The model is then calibrated and updated using dynamic vibration data obtained from environmental loads, ensuring the closest possible representation of the real structure. The updated model is applicable in various scenarios, including post-incident damage assessment, structural optimization, reinforcement planning, and ongoing health monitoring. To validate the proposed methodology, a real three-story structure was examined through vibration tests. The prepared finite element model was updated accordingly, and analysis of the results demonstrated strong agreement between the model's dynamic characteristics and the actual structure, affirming the effectiveness of the proposed approach.

Keywords

Semi-Rigid Saddle Connection, Finite Element Model Updating, Vibration Test, Noise

۱- مقدمه

اتصال خورجینی، یکی از روش‌های متداول در ساخت سازه‌های فولادی در گذشته بوده که به دلیل سهولت اجرا، هزینه پایین و سرعت ساخت، محبوبیت زیادی داشته است. این نوع اتصال عمدتاً در ایران و برخی مناطق اسپانیا مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، زلزله منجیل در سال ۱۳۶۹ نشان داد که بسیاری از ساختمان‌هایی که دارای این نوع اتصال بودند، دچار تخریب گسترده شدند. دلیل این موضوع آن است که قاب‌های دارای اتصال خورجینی، صرفاً برای تحمل بارهای ثقلی طراحی می‌شوند و به دلیل مقداری گیرداری و عدم طراحی آن‌ها برای نیروهای جانبی، عملکرد مطلوبی در برابر زلزله ندارند. بنابراین، در ساختمان‌هایی که از این نوع اتصال استفاده می‌شود، لازم است بارهای جانبی به کمک مهاربندها مهار شوند یا اتصال به گونه‌ای تغییر یابد که توانایی تحمل نیروهای وارده را داشته باشد.

مطالعات مختلفی در مورد درک رفتار لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها با اتصالات خورجینی انجام شده است [۱-۵]. مقدم، عملکرد این نوع سازه‌ها را در زلزله ۱۳۶۹ منجیل مطالعه کرده و توصیه‌هایی برای مقاوم‌سازی آن‌ها ارائه داده است [۶]. امیری و همکاران، عملکرد لرزه‌ای چنین سازه‌هایی را با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی بررسی کرده و روشی برای مقاوم‌سازی اتصالات خورجینی پیشنهاد کرده‌اند [۷]. مطالعه آن‌ها نشان داد که سیستم بهبودیافته، قادر است عملکرد ایمنی زندگی را با حاشیه اطمینان نسبتاً بالا تأمین نماید.

حسینی هاشمی و حسن‌زاده، یک ساختمان فلزی با اتصالات خورجینی و میان‌قاب را که در زلزله بم آسیب دیده بود، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مطالعه کردند [۸]. آن‌ها از توصیه‌های FEMA-356 برای فرآیند ارزیابی استفاده کردند. نتایج، نشان‌دهنده تطابق خوبی بین رفتار کلی مدل غیرخطی و پاسخ مشاهده‌شده بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که در چنین سیستم پیچیده‌ای، میان‌قاب‌ها در جلوگیری از فروریختن سازه نقش دارند و بیش‌تر انرژی توسط آن‌ها جذب و دفع شده است.

مزروعی و همکاران، روشی برای تقویت اتصالات خورجینی با افزودن بال‌های بالایی و پایینی و ورق‌های اتصال پیشنهاد کردند. در این روش افزایش قابل‌توجهی در سختی اتصال به‌وجود آمد که منجر به عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های سنتی شد [۹]. شکیب و همکاران، آسیب‌پذیری لرزه‌ای و مقاوم‌سازی یک ساختمان فولادی ۱۹ طبقه با اتصالات نیمه‌صلب در شهر تهران را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. نتایج نشان داد که ساختمان به اندازه

کافی قوی است تا در برابر بارهای قائم مقاومت کند، اما مقاومت آن برای بارهای جانبی لرزه‌ای کافی نبود.

کیانی و همکاران، تحلیل غیرخطی دینامیکی افزایشی (IDA) بر روی مدل‌های ساختمانی سه و پنج طبقه با اتصالات خورجینی که شامل قاب‌های بدون بادبند با میان‌قاب آجری، قاب‌های با بادبندهای هم‌محور و قاب‌های با میان‌قاب آجری تحت تأثیر رکوردهای واقعی زمین‌لرزه انجام و نشان دادند که مقاوم‌سازی سازه‌های موجود بسیار حیاتی است [۱۱].

گنجی‌مراد و همکاران، یک اتصال خورجینی صلب با مقاطع تیر کاهش‌یافته را برای سازه‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله ارائه دادند [۱۲]. در این اتصال، دو تیر از کنار وجه‌های ستون عبور می‌کنند و به ستون از طریق صفحات عمودی متصل می‌شوند. آن‌ها برای برطرف‌نمودن مشکل کمناش موضعی جان و کمناش پیچشی جانبی و بهبود عملکرد اتصالات خورجینی با مقاطع تیر کاهش‌یافته و ورق‌های تقویت‌کننده جان استفاده نمودند.

میرقادری و دهقانی رنانی، با اضافه‌کردن صفحات قائم که به بال‌های ستون و تیر جوش می‌شوند، اتصالات خورجینی نیمه‌صلب را به اتصالات صلب تبدیل نمودند و نشان دادند که ظرفیت خمشی این اتصالات بیش‌تر از مقاومت خمشی تیرهای متصل است [۱۳]. بنابراین انعطاف‌پذیری ساختاری در این سیستم سازه‌ای، تحت تأثیر رفتار خمشی انتهای تیرها قرار دارد و رفتار کل اتصالات و همچنین ستون می‌تواند به‌طور نسبی الاستیک باقی بماند.

سلیمانی و بهنام‌فر، یک رابطه سه پارامتری برای لنگر اتصالی که **میرقادری و دهقانی رنانی** [۱۳] پیشنهاد کردند، ارائه نمودند [۱۴]. این سه پارامتر شامل سختی اولیه، سختی پلاستیک و لنگر مرجع بود.

مقدم و صدرآرا، خصوصیات مکانیکی اتصالات خورجینی شامل مکانیزم انتقال لنگر، سختی اولیه، لنگر تسلیم، لنگر حداکثر را با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به‌دست آوردند و فرمول‌های تجربی برای پیش‌بینی این خصوصیات ارائه نمودند [۱۵]. آن‌ها همچنین روشی برای مقاوم‌سازی و بهبود خصوصیات مکانیکی اتصالات خورجینی موجود ارائه کردند [۱۶].

مصطفایی و مزروعی، رفتار هیسترتیک پنج نوع اتصال خورجینی به‌سازی‌شده را مطالعه و روشی برای افزایش ظرفیت خمشی و سختی اتصال ارائه کردند [۱۷]. رفتار چرخه‌ای و معیارهای پذیرش اتصالات خورجینی متداول توسط **امیری و آقاچوچک** ارزیابی شد [۱۸]. آن‌ها نتیجه گرفتند که شکست



زود هنگام جوش‌های تیر و ستون در اتصالات خورجینی، علت اصلی کاهش ظرفیت خمشی است.

تهرانی زاده، آزمایش ارتعاش اجباری بر روی یک ساختمان چهار طبقه با مقیاس یک‌دوم با اتصالات خورجینی انجام داد تا پاسخ دینامیکی آن را شناسایی کند و نتیجه‌گیری کرد که برای اطمینان از پایداری جانبی سازه، به مهارهای جانبی در جهت‌های عمود نیاز است [۱۹].

کاظم و همکاران، خواص دینامیکی سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و نسبت‌های میرایی یک ساختمان چهار طبقه با اتصالات خورجینی را قبل و بعد از بهسازی لرزه‌ای مورد بررسی و مقایسه قرار دادند [۲۰].

موصمی و همکاران، ارتعاش آزاد قاب‌ها با اتصالات خورجینی را مطالعه کردند. آن‌ها رفتار اتصالات را نیمه‌صلب فرض کرده و اتصالات را با فنرهای چرخشی مدل‌سازی نمودند [۲۱].

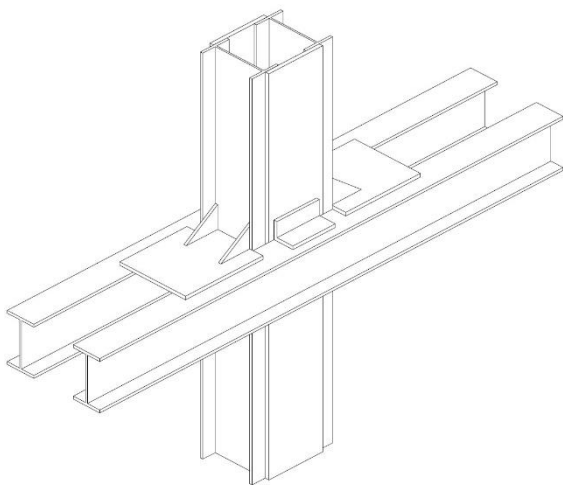
در سال‌های اخیر، پیش سلامت سازه و به‌روزرسانی مدل‌های عددی مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای دستیابی به مدل‌های منطبق با رفتار واقعی سازه‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این رویکردها، اطلاعات مودال استخراج‌شده از پاسخ‌های ارتعاشی سازه تحت تحریک‌های محیطی، مبنای کالیبراسیون مدل اجزای محدود قرار می‌گیرد تا عدم قطعیت‌های ناشی از ساده‌سازی‌های مدل‌سازی، فرضیات اولیه مصالح و شرایط مرزی کاهش یابد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مدل‌های به‌روزرسانی‌شده، علاوه بر افزایش دقت تحلیل‌های سازه‌ای، می‌توانند به‌عنوان زیرساختی قابل اعتماد برای پیش وضعیت، ارزیابی عملکرد و حتی شناسایی آسیب‌های احتمالی در سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، کاربرد این رویکردها در سازه‌های فولادی دارای اتصالات نیمه‌صلب خورجینی، به‌ویژه بر پایه داده‌های ارتعاشات محیطی، همچنان با کمبود مطالعات نظام‌مند مواجه است.

با وجود اینکه امروزه استفاده از اتصالات خورجینی در سازه‌های فولادی به‌ندرت مشاهده می‌شود، همچنان تعداد قابل توجهی از ساختمان‌های موجود در کشور با استفاده از این نوع اتصال ساخته شده‌اند. بررسی رفتار واقعی این سازه‌ها و دستیابی به مدلی عددی که بتواند پاسخ دینامیکی آن‌ها را با دقت مناسب بازتولید کند، از چالش‌های مهم در تحلیل و ارزیابی این دسته از ساختمان‌ها به‌شمار می‌رود. مطالعات پیشین، نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق اتصالات خورجینی و کالیبراسیون مدل‌های اجزای محدود بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، کم‌تر

مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، با هدف رفع این خلأ، ابتدا یک مدل اجزای محدود مناسب برای قاب‌های فولادی دارای اتصال خورجینی ارائه می‌شود؛ سپس با بهره‌گیری از اطلاعات مودال استخراج‌شده از آزمایش‌های ارتعاشی سازه تحت تحریک‌های محیطی، الگوریتمی برای به‌روزرسانی و کالیبراسیون مدل عددی توسعه داده می‌شود تا بیش‌ترین تطابق ممکن میان مدل تحلیلی و رفتار واقعی سازه حاصل شود. مدل اجزای محدود به‌روزرسانی‌شده، مبنایی قابل اتکا برای انجام تحلیل‌های سازه‌ای مختلف فراهم می‌آورد و می‌تواند در کاربردهایی نظیر ارزیابی عملکرد سازه، تحلیل سناریوهای مختلف رفتاری و در صورت نیاز، پیش دوره‌ای تغییرات پاسخ دینامیکی سازه مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مدل اجزای محدود قاب فولادی با اتصال خورجینی نیمه‌صلب

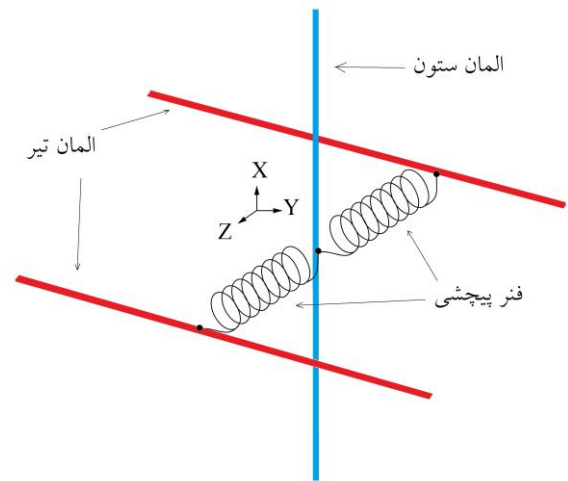
نشریه ۳۲۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران تحت عنوان "ضوابط طراحی ساختمان‌های با اتصال خورجینی"، این نوع اتصالات را به دو دسته اتصالات ساده و گیردار دسته‌بندی می‌کند [۲۲]. شکل (۱) نحوه اجرای اتصال خورجینی گیردار بر اساس توصیه نشریه ۳۲۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از اتصال خورجینی گیردار طبق توصیه نشریه ۳۲۴

بر اساس دستورالعمل این نشریه، یک اتصال خورجینی زمانی می‌تواند به‌صورت کاملاً گیردار فرض شود که سختی چرخشی اولیه اتصال، بیش‌تر از ۲۰۰۰ تن‌متر بر رادیان بوده و اتصال قابلیت انتقال نیروهای افقی و قائم وارده و لنگر خمشی در حد ظرفیت خمشی تیر را داشته باشد.

اگرچه از نظر تئوری می توان اتصال با شرایط فوق الذکر را طراحی نمود، اما در عمل به دلایل مختلف از قبیل کاستی های اجرایی، ممکن است گیرداری کامل حاصل نشود و اتصال به صورت نیمه صلب عمل کند. در چنین مواردی، نشریه ۳۲۴ توصیه می کند که سختی اتصال با استفاده از آزمایش و یا با تحلیل دقیق و در نظر گرفتن همه شرایط و محدودیت های اتصال، تعیین شود. از آنجایی که هدف از پژوهش حاضر، شناسایی وضعیت سازه های موجود با اتصالات خورجینی است، در این مقاله یک مدل اجزای محدود ساده شده به منظور مدل سازی این نوع اتصالات پیشنهاد شده است. شکل (۲) مدل اجزای محدود پیشنهادی را به صورت شماتیک نشان می دهد. مطابق این شکل در اتصال خورجینی نیمه صلب، تیر مورد نظر به صورت دو المان پیوسته گذرنده از طرفین ستون در نظر گرفته می شود.



شکل ۲- مدل سازی اتصال نیمه صلب خورجینی با فنرهای پیچشی

در محل اتصال مطابق با شکل، دو گره در تیرهای طرفین و یک گره در ستون توسط دو المان لینک به یکدیگر متصل می شوند. لینک های مذکور به صورت فنرهای پیچشی عمل کرده و از نظر انتقال و چرخش حول سایر محورها صلب در نظر گرفته می شوند:

$$\begin{aligned} U_X &= 0 & R_X &= 0 \\ U_Y &= 0 & R_Y &= 0 \\ U_Z &= 0 & R_Z &= F(k) \end{aligned} \quad (1)$$

در این روابط (U) و (R) به ترتیب نشان دهنده جابه جایی و دوران حول محورهای X و Y و Z، هستند و (R_Z) تابعی از (k) یعنی سختی پیچشی المان لینک حول محور طولی آن است. مدل اجزای محدود مورد استفاده در این پژوهش از نقطه نظرات زیر دارای مزیت است:

- ۱- در نظر گرفتن دو المان تیر در طرفین ستون به حفظ پیوستگی تیرها و ستون های قاب و انطباق مدل با واقعیت کمک می کند.
- ۲- یکی از چالش ها در قاب های با اتصالات خورجینی، عدم تقارن بارگذاری بر روی تیرهای دو طرف یک ستون با چشمه باربر نامتقارن است که مدل مورد استفاده در این پژوهش به سادگی این موضوع را پوشش می دهد.
- ۳- المان لینک در نظر گرفته شده در مدل به سادگی با استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود متداول از جمله SAP2000، Opensees و ... قابل پیاده سازی است.
- ۴- فنر پیچشی در نظر گرفته شده با توجه به نوع تحلیل مورد نظر، می تواند به صورت خطی یا غیرخطی تعریف شود. در این صورت سختی فنر مذکور باید با استفاده از یک روش مناسب تعیین شود.

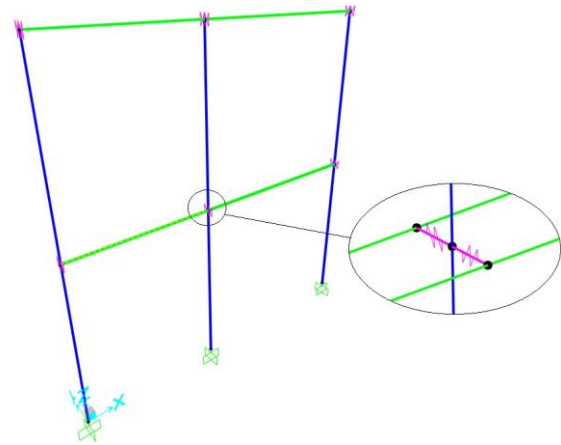
۳- به روزرسانی مدل اجزای محدود

در بخش قبل، یک مدل اجزای محدود برای شبیه سازی اتصالات نیمه صلب خورجینی در قاب های فولادی معرفی شد. پیش از به کارگیری این مدل در تحلیل های مختلف، لازم است آن را متناسب با شرایط واقعی سازه مورد مطالعه به روزرسانی کرد. به بیان دیگر، ضروری است که صلبیت اتصال به گونه ای تعیین شود که رفتار دینامیکی مدل اجزای محدود، به رفتار واقعی سازه نزدیک باشد. برای این منظور، سختی فنرهای پیچشی مورد استفاده در مدل باید مشخص شود. در پژوهش حاضر، هدف مدل سازی سازه های اسکلت فلزی موجود مجهز به این نوع اتصال با استفاده از اطلاعات مودال است، به همین دلیل سختی پیچشی فنرها با فرض رفتار خطی تعیین می شود.

شکل (۳) مدل اجزای محدود یک قاب دودانه دو طبقه را نشان می دهد که اتصالات آن با استفاده از مدل پیشنهادی در بخش قبل در نرم افزار SAP2000 مدل سازی شده اند. مشخصات هندسی و مکانیکی و بارگذاری این قاب به طور مفصل در بخش بعدی ارائه خواهد شد. در این بخش، هدف بررسی حساسیت اطلاعات مودال قاب نسبت به صلبیت اتصالات آن است. به همین منظور، سختی فنرهای پیچشی قاب در بازه ۱۰ تا ۵۰۰۰ تن متر بر رادیان تغییر داده شد و فرکانس طبیعی اول قاب برای مقادیر مختلف سختی ها محاسبه شد.

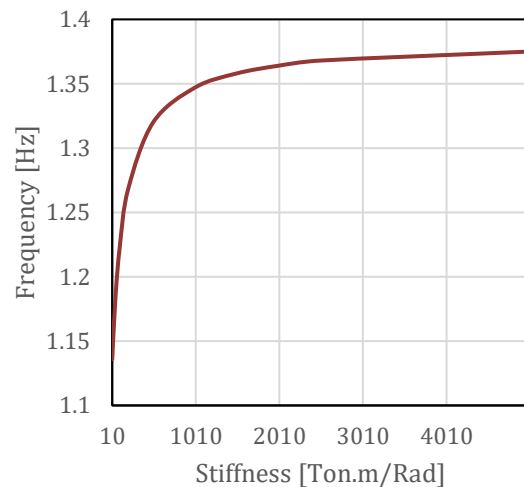
شکل (۴) نمودار تغییرات فرکانس طبیعی اول قاب را به ازای مقادیر مختلف سختی پیچشی اتصال نشان می دهد. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود، تغییر صلبیت اتصال تأثیر قابل توجهی بر فرکانس طبیعی سازه دارد. به همین دلیل، در این پژوهش، فرکانس های طبیعی و شکل مودهای استخراج شده از

آزمایش‌های ارتعاشی سازه برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳- مدل‌سازی قاب دوبعدی با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی در نرم‌افزار SAP2000 با استفاده از المان Link

بررسی دقیق‌تر نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد که به‌ازای سختی‌های بالاتر از ۲۰۰۰ تن متر بر رادیان، تغییر در اطلاعات مودال قاب بسیار کاهش یافته، به‌طوری‌که فرکانس طبیعی اول قاب تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این موضوع، توصیه‌ی نشریه ۳۲۴ مبنی بر صلب در نظر گرفتن اتصالات خورجینی با سختی پیشگی بالاتر از ۲۰۰۰ تن متر بر رادیان را تأیید می‌نماید.



شکل ۴- تغییرات فرکانس اول قاب به‌ازای مقادیر مختلف سختی پیشگی اتصالات قاب

در این پژوهش، تابع هدف مبتنی بر اطلاعات مودال به‌منظور تعیین مقادیر بهینه سختی فنرهای پیشگی اتصال نیمه‌صلب خورجینی به‌صورت زیر تعریف شد:

$$j(K) = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{f}_i - f_i(K))^2}{(\hat{f}_i)^2} + \sum_{i=1}^n \frac{\|\hat{\phi}_i - \phi_i(K)\|^2}{\|\hat{\phi}_i\|^2} \quad (2)$$

در این رابطه، (K) یک بردار شامل سختی‌های پیچشی اتصالات خورجینی قاب است. مقادیر (\hat{f}_i) و $(\hat{\phi}_i)$ به‌ترتیب نشان‌دهنده فرکانس‌های طبیعی و شکل مودال استخراج‌شده از آزمایش‌های ارتعاشی هستند، درحالی‌که $f_i(K)$ و $\phi_i(K)$ مقادیر متناظر به‌دست‌آمده از مدل اجزای محدود برای یک مقدار مشخص از بردار K است. همچنین تعداد مودهای در نظر گرفته‌شده در فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود با (n) نشان داده می‌شود. به‌کمک یک الگوریتم بهینه‌یابی مناسب، می‌توان مقدار بهینه بردار K را به‌گونه‌ای تعیین کرد که رفتار دینامیکی مدل اجزای محدود بیش‌ترین تطابق را با سازه واقعی داشته باشد:

$$K = \text{Arg min}_K j(K) \quad (3)$$

شکل (۵)، فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود قاب فولادی با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- الگوریتم به‌روزرسانی مدل اجزای محدود قاب فولادی با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی

از مدل اجزای محدود به‌روزرسانی‌شده، می‌توان به‌منظور انجام مطالعات پایش سلامت سازه مورد مطالعه در آینده بهره‌جست.

۴- بررسی یک مدل عددی

در این مقاله به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی و نیز نشان‌دادن نحوه پیاده‌سازی آن، در گام نخست یک مدل عددی مطابق با قاب دوبعدی نشان داده‌شده در شکل (۳) مورد توجه قرار گرفت. مشخصات هندسی و مکانیکی قاب مورد مطالعه مطابق با جدول (۱) است. در مدل‌سازی قاب در نرم‌افزار

SAP2000، سختی پیچشی فنرهای اتصالات ستون میانی و ستون‌های کناری به ترتیب ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ تن‌متر بر رادیان در نظر گرفته شدند.

جدول ۱- مشخصات هندسی و مکانیکی و بارگذاری مدل عددی

نوع پارامتر	اختصاص
مقطع تیرها	2IPE16
مقطع ستون‌ها	IPB22
دهانه تیرها	3m, 4m
ارتفاع طبقات	3.5 m
نوع فولاد مصرفی	ST37
بار گسترده ثقیلی هر یک از تیرها	2.5 t/m

این انتخاب به دلیل محدودیت‌های اجرایی در پیاده‌سازی اتصالات صلب در انتهای دهانه‌ها صورت گرفته است. هدف از این مطالعه، تعیین سختی‌های مذکور با استفاده از الگوریتم پیشنهادی است. برای این منظور یک بار تصادفی با توزیع نرمال به‌عنوان ارتعاش محیطی به‌صورت یک سیگنال شتاب در تراز تکیه‌گاه‌های قاب به آن اعمال شد و پاسخ شتاب سازه در تراز دو طبقه به‌کمک آنالیز تاریخیچه زمانی محاسبه شد. به‌عبارت دیگر، فرض شد که دو حسگر شتاب‌سنج در دسترس است که هر کدام در تراز یک طبقه و در انتهای دهانه قاب نصب شده‌اند. مدت‌زمان اعمال بار محیطی ۱۰ دقیقه و گام زمانی در تحلیل سازه برابر با ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. پاسخ‌های مذکور به‌عنوان اطلاعات دینامیکی به‌دست‌آمده از تست ارتعاشی سازه در نظر گرفته شدند. از آنجایی که در شرایط واقعی، اطلاعات دینامیکی اندازه‌گیری شده توسط حسگرها معمولاً آغشته به نویز هستند، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، پاسخ‌های شتاب محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار به نویز سفید گوسی نیز آلوده شدند. برای این کار از تابع $awgn()$ در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. نسبت دامنه سیگنال به نویز (SNR) در این تابع برابر با ۴ در نظر گرفته شد. این میزان معادل نویزی با دامنه ۵۰ درصد است که در مسائل واقعی معمولاً مقدار بالایی محسوب می‌شود [۲۳]. سپس فرکانس‌ها و شکل مودهای اول و دوم قاب با استفاده از داده‌های مذکور به‌روش SSI محاسبه شد. این اطلاعات مودال، به‌عنوان داده‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده قاب در نظر گرفته شدند.

در مرحله بعد، اتصالات به سه گروه تقسیم شدند. بر اساس تصویر نشان داده‌شده در شکل (۳)، سختی اتصالات در ستون وسطی برای هر یک از طبقات با (K_1) ، سختی اتصالات در ستون

سمت راست در هر یک از طبقات با (K_2) و سختی اتصالات در ستون سمت چپ برای هر یک از طبقات با (K_3) نام‌گذاری شد. لذا بردار مجهولات مسئله به‌صورت $K = [K_1, K_2, K_3]$ تعریف می‌شود. بنابراین، تابع هدف بر اساس اطلاعات مودال مربوط به دو مود طبیعی اول قاب تشکیل شد و به‌کمک برنامه نویسی API، برنامه کامپیوتری نوشته‌شده در محیط MATLAB به نرم‌افزار اجزای محدود SAP2000 مرتبط شد. با استفاده از تابع $fmincon()$ در محیط متلب، مقادیر پارامترهای مجهول به نرم‌افزار اجزای محدود فرستاده می‌شوند و اطلاعات مودال متناظر با آن‌ها به محیط برنامه‌نویسی برگردانده می‌شود. این فرایند تا مینیمم شدن تابع هدف و به‌دست‌آمدن بهترین مقادیر برای سختی‌ها ادامه پیدا می‌کند. جدول (۲) مقادیر خطای برآورد سختی فنرها را برای قاب عددی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر خطای برآورد سختی اتصالات در مدل عددی

سختی اتصال	مقدار خطای برآورد (درصد)
K_1	0.012
K_2	0.098
K_3	0.030

مقادیر جدول (۲) به‌خوبی بیانگر موفقیت الگوریتم پیشنهادی در برآورد سختی اتصالات نیمه‌صلب قاب عددی مورد مطالعه هستند. نتایج تحلیل‌های تکمیلی روی این مدل نشان داد که با کاهش دامنه نویز، خطای برآورد سختی اتصالات قاب به‌تدریج کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود.

با این حال، مدل‌های واقعی عموماً از پیچیدگی بیش‌تری نسبت به مدل‌های عددی برخوردارند. حضور بادبندها، سختی تیغه‌ها و سایر اجزای غیرسازه‌ای ساختمان‌های دارای اتصالات خورجینی، فرایند برآورد سختی این اتصالات را به‌مراتب دشوارتر می‌سازد. از این‌رو، در این پژوهش به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر الگوریتم پیشنهادی و شناسایی نقاط ضعف احتمالی آن، مدل اجزای محدود یک سازه واقعی به‌روزرسانی شد که در بخش بعد به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵- به‌روزرسانی مدل اجزای محدود یک سازه سه‌طبقه

در این پژوهش، به‌منظور انجام مطالعه بر روی یک سازه واقعی، مدل اجزای محدود مربوط به یک ساختمان سه‌طبقه با اسکلت فولادی و اتصالات خورجینی مورد تحلیل قرار گرفت. شکل (۶) نمایی از ساختمان مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ساختمان مذکور در بندر خرمشهر واقع شده و بیش از ۴۵ سال از عمر بهره‌برداری آن می‌گذرد. با وجود این، پایش سلامت سازه به‌منظور تداوم

استفاده ایمن از آن برای کارفرما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود. از این رو، تلاش شد تا مدل اجزای محدود سازه با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادشده در این تحقیق و بر اساس شرایط واقعی ساختمان به‌روزرسانی شود.



شکل ۶- نمایی از ساختمان سه‌طبقه مورد مطالعه

بدین ترتیب امکان شناسایی نواقص یا آسیب‌های احتمالی در آینده از طریق مقایسه وضعیت کنونی با وضعیت پیشین سازه فراهم می‌شود.

سازه باربر مورد مطالعه، شامل یک اسکلت فولادی سه‌طبقه است که به‌واسطه درز انقطاعی با عرض تقریبی ۱۰ سانتی‌متر به دو نیم‌سازه کاملاً مستقل که در ادامه تحت عنوان نیم‌سازه‌های غربی و شرقی معرفی می‌شوند، تقسیم شده است. در این پژوهش، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود هر دو نیم‌سازه ضرورت داشت؛ با این حال، به‌منظور اجتناب از تکرار مباحث و افزایش حجم مقاله، صرفاً روند مدل‌سازی و نتایج حاصل برای نیم‌سازه غربی ارائه می‌شود.

ساختمان مذکور شامل سه طبقه روی زمین بوده و فاقد زیرزمین است. سیستم فونداسیون به‌صورت پی گسترده اجرا شده است. پلان یکی از طبقات نیم‌سازه غربی به‌همراه یکی از قاب‌های آن در شکل (۷) ارائه شده است. در ادامه به شرح جزئیات تست‌های دینامیکی انجام شده، نحوه مدل‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود.

۵-۱- مدل اجزای محدود اولیه

در فاز نخست پژوهش، بر اساس نقشه‌های اجرایی، یک مدل اجزای محدود اولیه با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تهیه شد. در این مدل، ابتدا اجزای باربر سازه شامل تیرها، ستون‌ها و کف‌ها مدل‌سازی شدند. اتصال سازه به زمین در تراز پی به‌صورت مفصلی فرض شده و اثر اندرکنش خاک و سازه نادیده گرفته شد. در این ساختمان، اتصال تیرهای سقف در امتداد ضلع بلندتر به

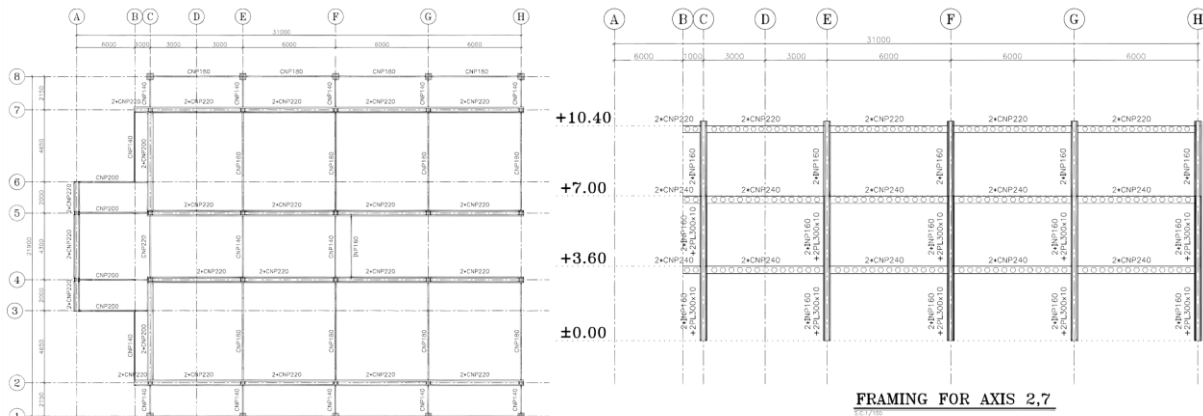
ستون‌ها به‌صورت خورجینی و در امتداد عمود بر آن، مفصلی اجرا شده‌اند و در هر دو راستا نیز تنها میان‌قاب‌ها وظیفه تأمین سختی جانبی سازه را بر عهده دارند. بر اساس توصیه نشریه FEMA356 می‌توان میان‌قاب‌های بنایی را در ساختمان‌های اسکلتی با اعضای قطری فشاری مدل‌سازی نمود. بر این اساس، به‌منظور لحاظ‌نمودن نقش میان‌قاب‌ها در سختی جانبی سازه، این عناصر در مدل اولیه به‌صورت بادبندهای معادل در نظر گرفته شدند. همچنین، اتصالات خورجینی مطابق توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های پیشین به‌کمک فنرهای پیچشی مدل‌سازی شد. از آنجا که هدف اصلی این پژوهش طراحی سازه نبوده است، جرم هر یک از طبقات به‌صورت یک بار گسترده معادل، شامل ترکیبی از بارهای مرده، زنده و سربار تیغه‌بندی، با ضریب واحد در نظر گرفته شد. با توجه به این توضیحات در مرحله به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، سه پارامتر شامل سختی بادبندهای معادل، بار گسترده طبقات و سختی فنرهای پیچشی به‌عنوان مجهولات مسئله در نظر گرفته شده و فرآیند به‌روزرسانی بر اساس آن‌ها انجام خواهد گرفت. شکل (۸) نمایی از مدل‌سازی میان‌قاب‌های ساختمان به‌کمک بادبندهای معادل را در پلان طبقات نشان می‌دهد.

۵-۲- استخراج اطلاعات مودال سازه

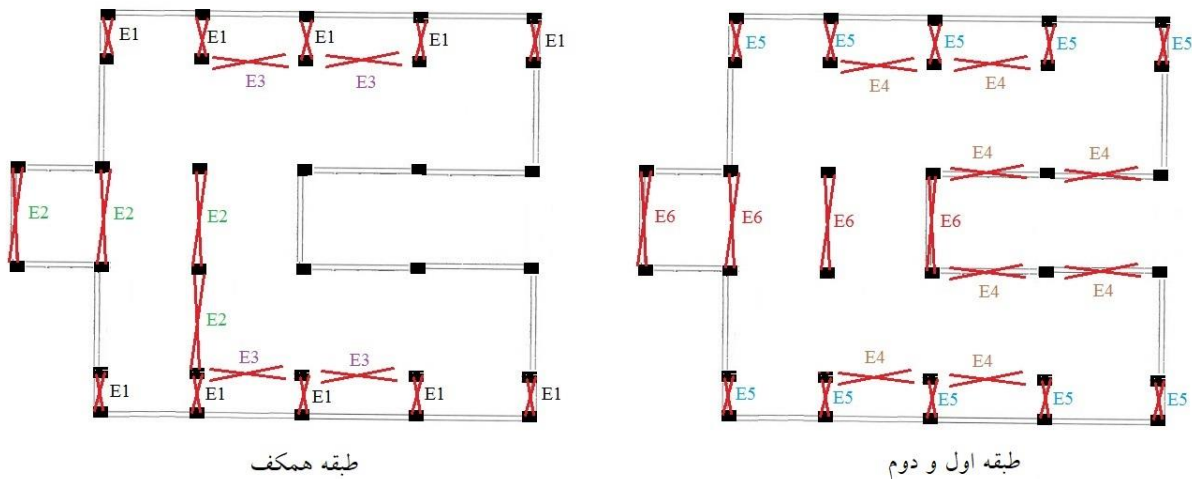
در این پژوهش استخراج مشخصات مودال سازه، بر پایه تحلیل ارتعاشات محیطی حاصل از آزمایش‌های دینامیکی انجام گرفت. قبل از شروع آزمایش‌ها نیاز به جمع‌آوری اطلاعات اولیه درخصوص سازه است. برای این منظور ابتدا مدل اجزای محدود سازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز مودال بر روی مدل اجزای محدود نیم‌سازه غربی ساختمان مورد مطالعه نشان داد که فرکانس‌های متناظر با شش مود اولیه در بازه فرکانسی [۰-۱۵] هرتز قرار دارند. این نتایج، همراه با بررسی شکل مودهای سازه، اطلاعات ارزشمندی را درخصوص نحوه چیدمان حسگرها و تعیین نرخ نمونه‌برداری داده‌ها برای انجام آزمایش فراهم نمود. بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، برای ثبت پاسخ ارتعاشی سازه از شش عدد شتاب‌سنج دیجیتال سه‌محوره ساخت شرکت لرزه‌نگار پارسیان استفاده شد. حساسیت این شتاب‌سنج‌ها تقریباً برابر با $10^{-5} \times 3/86$ متر بر مجذور ثانیه است که آن‌ها را قادر به ثبت ارتعاشات محیطی سازه با دامنه بسیار کوچک می‌کند. نرخ نمونه‌برداری داده‌ها برابر با ۲۰۰ هرتز انتخاب شد. بر این اساس، فرکانس نایکویست داده‌های ثبت‌شده برابر با ۱۰۰ هرتز است. با توجه به اینکه فرکانس مودهای مورد نظر بر اساس مدل اجزای

محیط نرم‌افزار SAP2000 و محل نصب حسگرها در پلان طبقات را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که قرارگیری حسگرها در دو انتهای ساختمان با هدف ثبت مودهای پیچشی، علاوه بر مودهای خمشی، انجام گرفته است.

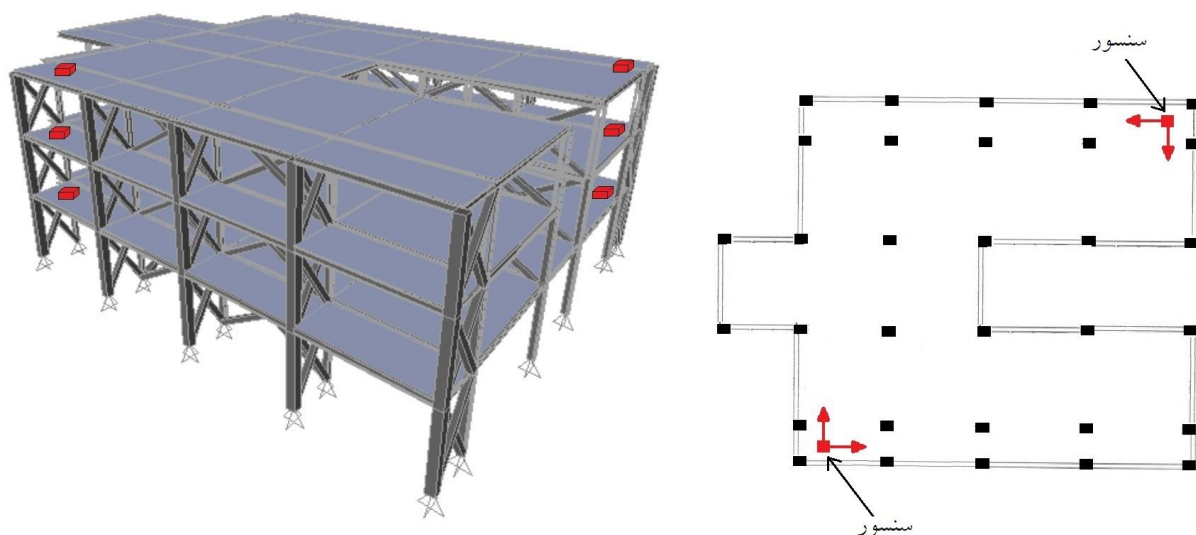
محدود اولیه در بازه [۰-۱۵] هرتز قرار دارند، انتخاب نرخ نمونه‌برداری یادشده، مناسب ارزیابی می‌شود؛ چراکه حدود ۱۳ برابر بزرگ‌تر از بیشینه فرکانس‌های مودال سازه است. بنابراین داده‌های ثبت‌شده فاقد خطای تداخل فرکانسی خواهند بود. شکل (۹) نمایی از مدل اجزای محدود اولیه نیم‌سازه غربی در



شکل ۷- پلان یکی از طبقات نیم‌سازه غربی به همراه یکی از قاب‌های آن در ساختمان سه‌طبقه مورد مطالعه



شکل ۸- میان‌قاب‌های معادل‌سازی شده با اعضای قطری در نیم‌سازه غربی ساختمان مورد مطالعه



شکل ۹- محل و جهت نسب حسگرها در آزمایش ارتعاش محیطی نیم‌سازه غربی ساختمان

نمودار شکل (۱۱) یک قطعه از سیگنال‌های شتاب ثبت شده توسط حسگرها به طول ۱۰۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد که دامنه ارتعاشات محیطی سازه مورد مطالعه به صورت میانگین جذر مربعات (RMS)^۱ سیگنال روی آن مشخص شده است. لازم به ذکر است که قله‌های ظاهر شده در سیگنال، مربوط به ارتعاش ساختمان در لحظاتی است که خودروهای سنگین از روی سرعت‌گیر مقابل ساختمان عبور نموده و باعث ایجاد لرزش شدید در سازه شده‌اند. به منظور بررسی سطح ارتعاشات محیطی ساختمان، مقادیر دامنه سیگنال‌های شتاب ثبت شده در هر سه طبقه ساختمان و در دو راستای اصلی سازه به صورت RMS محاسبه شد که در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، دامنه ارتعاشات محیطی از بالاترین طبقه به پایین‌ترین طبقه کاهش می‌یابد، به طوری که حداکثر RMS شتاب برابر با $10^{-4} \times 1/384$ و حداقل آن برابر با $10^{-5} \times 7/015$ متر بر مجذور ثانیه است.

جدول ۳- دامنه ارتعاشات محیطی سازه در طبقات و جهات مختلف

شماره طبقه	RMS سیگنال‌های شتاب در جهت x (m/s ²)	RMS سیگنال‌های شتاب در جهت y (m/s ²)
1	7.0153E-05	7.0975e-05
2	8.9906E-05	9.3288e-05
3	1.1829E-04	1.3836E-04

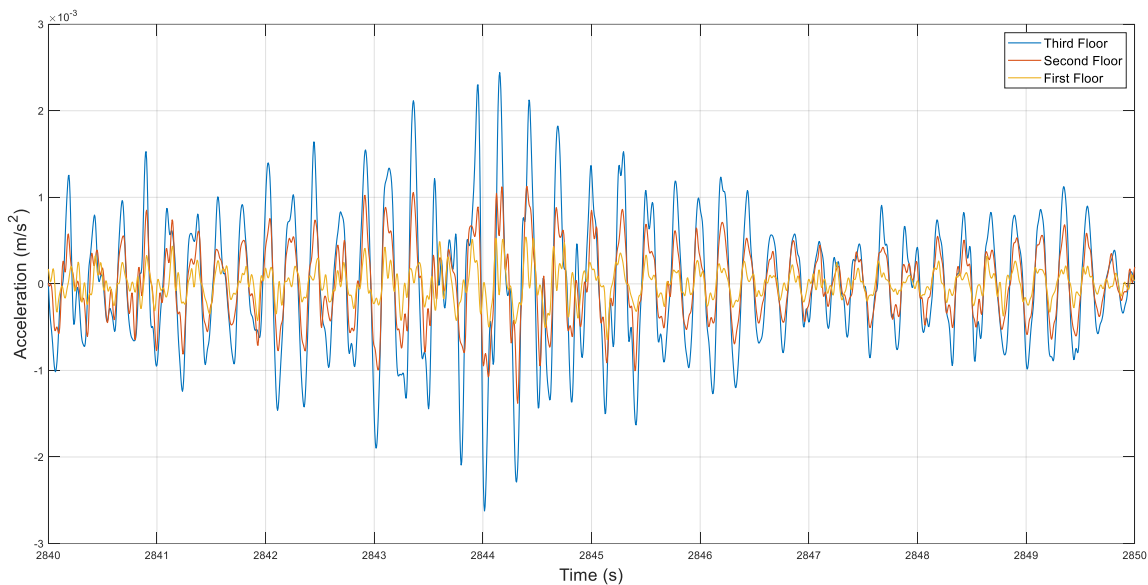
در گام بعدی پروژه، داده‌های به دست آمده از تست ارتعاش محیطی، تحت عملیات پردازش سیگنال قرار گرفتند تا بتوان به کمک آن‌ها اطلاعات مودال ساختمان شامل فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها را استخراج نمود. نکته مهم در ثبت پاسخ ارتعاشی سازه، هم‌زمانی داده‌ها و یا اصطلاحاً سینک‌بودن حسگرها به هنگام برداشت است. در این پژوهش، هم‌زمان‌سازی داده‌ها به صورت سخت‌افزاری و از طریق یک آنتن محلی مشترک برای کلیه حسگرها انجام شده است. خروجی هر حسگر، به ازای هر داده برداشت شده، شامل یک رکورد با دو جزء مشخص است: زمان ثبت داده (با دقت میلی‌ثانیه) و مقدار شتاب اندازه‌گیری شده. پس از برداشت داده‌ها، به کمک یک برنامه کامپیوتری، تطابق زمانی رکوردهای ثبت شده توسط حسگرهای مختلف بررسی شد تا از نظر وجود هرگونه اختلال یا عدم انطباق زمانی، اطمینان حاصل شود. در نهایت، تنها بازه‌های زمانی پیوسته‌ای از سیگنال‌ها که از نظر انطباق زمانی، معتبر تشخیص داده شدند، در مراحل بعدی تحلیل مودال مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۱۰) مقایسه بین داده‌های ارتعاشی به دست آمده از سه حسگر واقع در طبقات اول تا سوم را در نیم‌سازه غربی در جهت عرضی ساختمان نمایش می‌دهد. دقت در این شکل، نشان می‌دهد که علاوه بر انطباق زمانی مناسب داده‌ها، همان‌طور که انتظار می‌رود دامنه ارتعاشی سازه با افزایش شماره طبقه نیز افزایش می‌یابد.

¹ Root Mean Square

اشکال مدهای سازه، تحت تأثیر اختلاف فاز قرار نگرفته و اعتبار آن‌ها حفظ می‌شود.

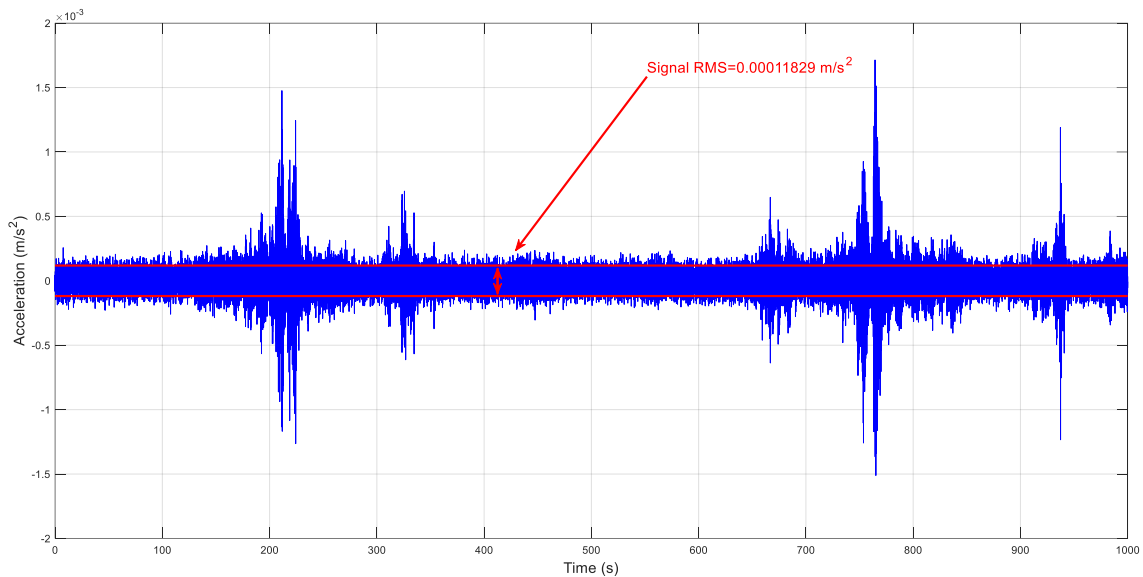
لازم به ذکر است که در این پژوهش، به منظور شناسایی مؤلفه‌های فرکانسی ناشی از عملکرد تجهیزات مکانیکی ساختمان، ابتدا تحلیل طیفی سیگنال‌های ثبت شده انجام شد و فرکانس‌های غالبی که رفتار پایداری در طول زمان داشته و با الگوی مودال سازه هم‌خوانی نداشتند، شناسایی شدند. این مؤلفه‌ها با مقایسه نتایج چند رکورد مستقل و بررسی ثبات فرکانسی آن‌ها تشخیص داده شدند. پس از شناسایی این فرکانس‌ها که معمولاً به منابع تحریک مکانیکی موضعی نسبت داده می‌شوند، اثر آن‌ها با انتخاب بازه‌های زمانی مناسب و نیز اعمال فیلترگذاری در حوزه فرکانس کنترل شد، به گونه‌ای که تنها پاسخ سازه ناشی از ارتعاشات محیطی در مراحل بعدی تحلیل مودال مورد استفاده قرار گیرد.

در پردازش اولیه داده‌ها برای اصلاح خط مبنا و کاهش اثرات نویز اندازه‌گیری، مقدار میانگین داده‌ها از آن‌ها حذف شد. سپس همه داده‌ها از فیلتر میان‌گذر باترورت مرتبه ۸ با باند گذر [۱-۲۰] هرتز عبور داده شدند. در این پژوهش، به منظور جلوگیری از ایجاد اختلاف فاز، فیلتر باترورت با استفاده از تابع $\text{filtfilt}()$ در نرم‌افزار متلب به صورت دوطرفه^۱ روی سیگنال‌ها اعمال شد. استفاده از این روش باعث حذف جابه‌جایی فاز می‌شود و پاسخ فیلتر از نظر فاز خشتی خواهد بود. بدین ترتیب، سیگنال‌های پردازش شده فاقد اختلاف فاز ناشی از فیلتر هستند و تنها دامنه فرکانس‌های خارج از باند مورد نظر کاهش می‌یابد. برای اطمینان از نتیجه، مقایسه‌ای بین سیگنال خام و سیگنال فیلترشده نیز انجام شد تا این اطمینان حاصل شود که هیچ اختلاف زمانی یا تغییر فازی در اثر فیلترکردن داده‌ها به وجود نمی‌آید؛ بنابراین نتایج استخراج شده، از جمله

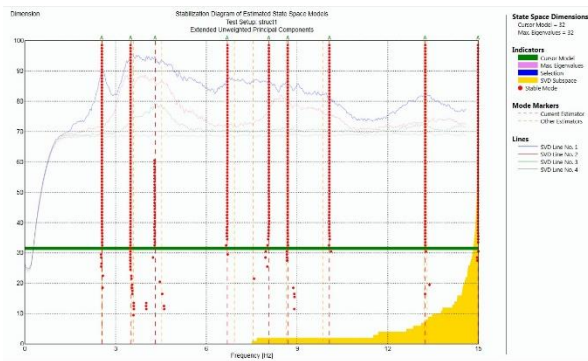


شکل ۱۰- کنترل هم‌زمانی پاسخ‌های ارتعاشی ثبت شده در طبقات مختلف نیم‌سازه غربی سازه

^۱ Forward-Backward



شکل ۱۱- یک سیگنال ارتعاشی ثبت شده در طبقه سوم نیم‌سازه غربی در جهت x ساختمان



شکل ۱۲- نمودار پایداری موده‌های به‌دست‌آمده از روش SSI-UPCX برای داده‌های ارتعاشی مربوط به نیم‌سازه غربی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نرم‌افزار با استفاده از روش SSI-UPCX تعداد هشت مود پایدار را با استفاده از این روش در باند فرکانسی [۰-۱۵] هرتز شناسایی نموده است. علاوه بر این، به‌کمک روش EFDD نیز تعداد شش مود طبیعی به‌روش جستار قله برای نیم‌سازه غربی شناسایی شد. از این شش مود برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود در مرحله بعد استفاده شد.

۳-۵- به‌روزرسانی مدل اجزای محدود

پس از به‌دست‌آوردن اطلاعات مودال سازه، به‌روزرسانی مدل اجزای محدود اولیه در دستور کار قرار گرفت. برای شروع کار، مقایسه‌ای بین اطلاعات مودال به‌دست‌آمده از آزمایش و مدل

در مرحله بعد برای تخمین چگالی‌های طیفی (PSD)^۱، هر سیگنال به چندین تکه با تعداد ۱۰۲۴ داده و ۶۶ درصد هم‌پوشانی تقسیم شد و از PSDهای حاصل، میانگین‌گیری به‌عمل آمد تا نمودارهای چگالی طیفی هموارتری به‌دست آید. همچنین به‌منظور افزایش وضوح^۲ نمودارهای چگالی طیفی، عمل بازنمونه‌برداری^۳ با فرکانس ۲۵ هرتز روی آنها انجام شد. درنهایت تجزیه مقدار تکین (SVD)^۴ روی ماتریس PSDها انجام شد. لازم به ذکر است که عملیات پردازش اولیه سیگنال‌ها به‌کمک نرم‌افزار تجاری ARTEMIS صورت گرفت. پس از پردازش اولیه سیگنال‌ها، از دو روش تجزیه دامنه فرکانس پیشرفته (EFDD)^۵ و شناسایی زیرفضای تصادفی (SSI)^۶ برای استخراج اطلاعات مودال سازه استفاده شد. شکل (۱۲) نمودارهای SVD مربوط به داده‌های به‌دست‌آمده از تست ارتعاشی در باند فرکانسی [۰-۱۵] هرتز و نمودار پایداری روش SSI-UPCX را به‌صورت منطبق بر نمودارهای روش EFDD برای نیم‌سازه غربی نشان می‌دهد.

¹ Power Spectral Density

² Resolution

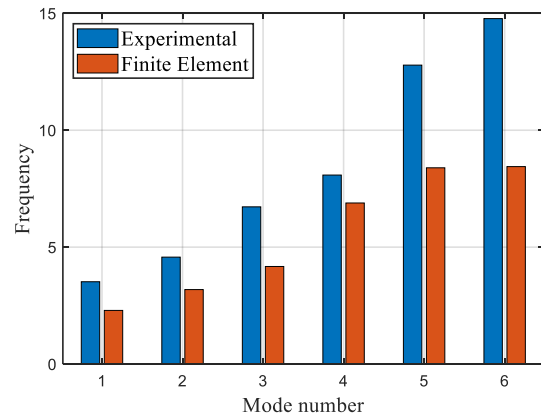
³ Resampling

⁴ Singular Value Decomposition

⁵ Enhanced Frequency Domain Decomposition

⁶ Stochastic Subspace Identification

اجزای محدود اولیه انجام شد. شکل (۱۳) نمودار مقایسه شش فرکانس اول مدل اجزای محدود اولیه را با فرکانس‌های سازه واقعی برای نیم‌سازه غربی ساختمان مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف زیادی بین نتایج وجود دارد. دلایل مهم این اختلاف، عدم تطابق سختی میان‌قاب‌های سازه با سختی اعضای قطری در نظر گرفته شده در مدل اولیه، عدم تطابق سختی اتصالات خورجینی با سختی اولیه فنرهای پیچشی مدل‌سازی شده و نیز اختلاف جرم واقعی طبقات سازه با جرم اولیه در نظر گرفته شده در نرم‌افزار است.



شکل ۱۳- مقایسه فرکانس‌های مدل اجزای محدود اولیه نیم‌سازه غربی با فرکانس‌های سازه واقعی

برای شروع فرایند به‌روزرسانی، همه اعضای قطری متناظر با میان‌قاب‌های سازه، با سطح مقطع مربعی با اضلاع ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند و مدول الاستیسیته این اعضا، با مقدار اولیه $E_{initial}=25 \text{ GPa}$ به‌عنوان مجهول در نظر گرفته شد تا در طول فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، مقدار مناسب آن به‌دست آید. این پارامتر در فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود به‌صورت $\theta_i E$ در نظر گرفته شد که θ_i ضریب به‌روزرسانی مدول الاستیسیته عضو قطری مورد نظر است. بار ثقلی کف طبقات به‌عنوان دومین مجهول در به‌روزرسانی مدل اجزای محدود است که مقدار اولیه برای بار ثقلی طبقات (مجموع بار مرده و زنده و پارتیشن‌ها) برابر با $W_{initial}=800 \text{ Kg/m}^2$ در نظر گرفته شد. این پارامتر نیز در فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود به‌صورت $\theta_i W$ در نظر گرفته شد که θ_i ضریب به‌روزرسانی بار ثقلی سقف مورد نظر است. سومین دسته از مجهولات مسئله، سختی فنرهای پیچشی است که بایستی مناسب‌ترین مقدار آن‌ها در فرایند به‌روزرسانی تعیین شود. مقدار اولیه سختی پیچشی تمام فنرها برابر با $K_{initial}=2000 \text{ ton.m/rad}$ در نظر گرفته شد. این پارامتر نیز در فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود به‌صورت $\theta_i K$

لحاظ شد که θ_i ضریب به‌روزرسانی سختی اتصال مورد نظر است.

بر اساس توضیحات فوق، پارامترهای انتخاب شده به‌منظور به‌روزرسانی مدل اجزای محدود اولیه شامل موارد زیر هستند:

- ضرایب مربوط به به‌روزرسانی مدول الاستیسیته اعضای قطری $\theta_1 = E_{FEM}/E_{initial}$ تا $\theta_6 = E_{FEM}/E_{initial}$ (شکل ۸).

- ضریب مربوط به به‌روزرسانی بار گسترده کف طبقات اول و دوم $\theta_7 = W_{FEM}/W_{initial}$

- ضریب مربوط به به‌روزرسانی بار گسترده بام $\theta_8 = W_{FEM}/W_{initial}$

- ضریب مربوط به به‌روزرسانی سختی اتصالات ستونهای میانی در قابها $\theta_9 = K_{FEM}/K_{initial}$

- ضریب مربوط به به‌روزرسانی سختی اتصالات ستونهای انتهایی در قابها $\theta_{10} = K_{FEM}/K_{initial}$

با توجه به موارد فوق، تعداد پارامترهای مدل برای به‌روزرسانی عدد ۱۰ است که به‌صورت بردار مجهولات $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{10}]$ در نظر گرفته می‌شوند. فرایند به‌روزرسانی با مقدار اولیه پارامترهای $E_{initial}$ ، $W_{initial}$ و $K_{initial}$ شروع می‌شود و بر اساس ضرایب θ_i به‌دست آمده، مقادیر نهایی پارامترهای E_{FEM} ، W_{FEM} و K_{FEM} تعیین می‌شوند.

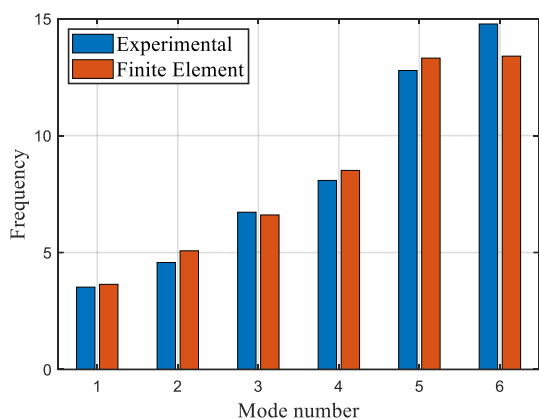
جدول ۴- مقادیر پارامترهای بهینه‌یابی قبل و بعد از به‌روزرسانی مدل

پارامتر	واحد	مقدار اولیه	مقدار بروز شده	نسبت تغییر (θ_i)
E1	kg/cm ²	250000	117421.11	0.47
E2	kg/cm ²	250000	248437.92	0.99
E3	kg/cm ²	250000	304578.51	1.22
E4	kg/cm ²	250000	62248.88	0.25
E5	kg/cm ²	250000	189619.13	0.76
E6	kg/cm ²	250000	117046.15	0.47
w1	kg/m ²	800	411.5	0.51
w2	kg/m ²	800	561.2	0.70
k1	ton.m/rad	2000	1723	0.86
k2	ton.m/rad	2000	1501	0.75

در ادامه، از رابطه (۲) برای به‌دست آوردن بهینه‌ترین مقدار پارامترها استفاده شد. به‌عبارت دیگر به‌روزرسانی پارامترهای مجهول، به‌صورتی انجام شد که اختلاف بین شش شکل مود اول و فرکانس‌های طبیعی متناظر با آن‌ها در مدل اجزای محدود با مقادیر مربوط به سازه واقعی حداقل شود. جدول (۴) مقادیر اولیه، مقادیر به‌روز شده و نسبت تغییر پارامترهای مجهول مسئله را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول، مشاهده می‌شود که سختی دیوارهای مختلف، مقادیر متفاوتی دارد که این امر ناشی از تفاوت در ضخامت و سایر ابعاد هندسی دیوارها است. بدیهی

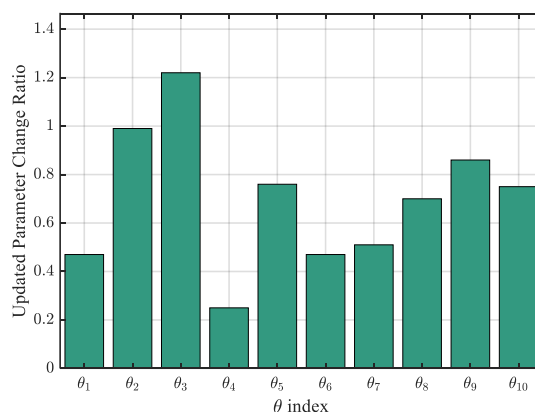
به منظور بررسی بیش‌تر نتایج، در نمودارهای شکل (۱۶) مقایسه‌ای بین شکل مودهای سازه و مدل اجزای محدود به‌روزرسانی‌شده در برخی از درجات آزادی انجام شده است. در این شکل‌ها نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود که اشکال مودی بعد از فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، بسیار به شکل مودهای به‌دست‌آمده از آزمایش نزدیک‌تر شده‌اند به‌طوری‌که سه مود اول از انطباق بسیار بالایی برخوردار هستند.

لازم به ذکر است که در این مطالعه موردی، تأثیر سختی میان‌قاب‌ها بر فرکانس‌های طبیعی سازه در مقایسه با سختی اتصالات خورجینی غالب‌تر است و نقش اصلی را در تأمین سختی جانبی ایفا می‌کنند؛ با این حال، سختی اتصالات خورجینی با وجود سهم کم‌تر، در توزیع سختی و بهبود انطباق پاسخ دینامیکی مدل عددی با رفتار واقعی سازه مؤثر بوده و از این رو در مدل لحاظ شده‌اند. از آنجایی که در این پژوهش مدل اجزای محدود ساختمان مورد مطالعه با رفتار دینامیکی نزدیک به رفتار سازه واقعی به‌روزرسانی شد، لذا می‌توان گفت که مدل اجزای محدود به‌دست‌آمده به‌عنوان یک مدل مرجع برای این ساختمان عمل می‌کند. به‌عبارت دیگر در صورت ادامه استفاده از ساختمان مذکور، در آینده می‌توان از این مدل برای کنترل تغییرات به‌وجودآمده در سازه و شناسایی آسیب‌های احتمالی در آن بهره جست.



شکل ۱۵- مقایسه فرکانس‌های مدل اجزای محدود به‌روزرسانی‌شده نیم‌سازه غربی با فرکانس‌های سازه واقعی

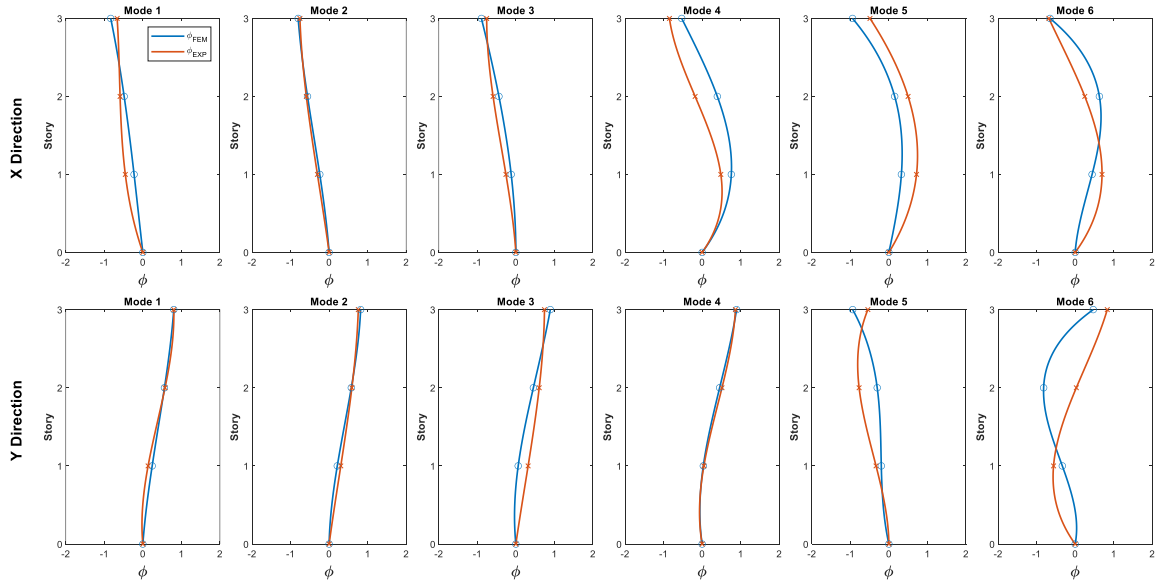
است دیوارهایی با ابعاد کوچک‌تر، سختی کم‌تری نسبت به دیوارهای قطورتر، از خود نشان می‌دهند. همچنین بررسی مقادیر به‌دست‌آمده برای بار ثقلی طبقات بیانگر آن است که این مقادیر، کم‌تر از مجموع بارهای مرده و زنده‌ای است که معمولاً در طراحی سازه منظور می‌شود. این اختلاف را می‌توان به ماهیت محافظه‌کارانه بار زنده در آیین‌نامه‌های طراحی نسبت داد، به‌گونه‌ای که در زمان انجام آزمایش، تنها بخش محدودی از بار زنده طراحی شده به‌طور واقعی در سازه موجود بوده است.



شکل ۱۴- نسبت تغییرات پارامترهای مدل بعد از به‌روزرسانی

همچنین طبق بررسی سختی فنرهای پیچشی، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، سختی اتصالات مربوط به ستون‌های میانی بزرگ‌تر از سختی اتصالات ستون‌های انتهایی قاب‌ها است. به‌منظور نمایش بصری میزان و جهت تغییرات پارامترهای بهینه‌یابی، یک نمودار میله‌ای از پارامترهای مذکور نیز ارائه شد. شکل (۱۴) خروجی پارامترهای فرایند کالیبراسیون مدل عددی را به‌صورت یک نمودار میله‌ای نمایش می‌دهد.

شکل (۱۵) مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی مدل اجزای محدود به‌روزرسانی‌شده نیم‌سازه غربی را با سازه واقعی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، ملاحظه می‌شود که مدل به‌روزرسانی‌شده نسبت به مدل اولیه بسیار به سازه واقعی نزدیک‌تر شده است. این موضوع گواهی بر موفقیت فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود ساختمان مورد نظر دارد.



شکل ۱۶- مقایسه شکل مودهای مدل اجزای محدود به روزرسانی شده نیم‌سازه غربی با شکل مودهای سازه واقعی

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، الگوریتمی نوین برای مدل‌سازی قاب‌های فولادی با اتصالات نیمه‌صلب خورجینی ارائه شد. مبنای این الگوریتم، معادل‌سازی اتصالات خورجینی با فنرهای پیچشی و تخمین سختی آن‌ها بر اساس داده‌های دینامیکی سازه است. به منظور ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی، تحلیل‌ها بر روی یک مدل عددی و یک سازه واقعی صورت گرفت. نتایج حاصل از مدل عددی، نشان داد که این الگوریتم حتی در شرایط نویزی، قادر است سختی اتصالات را با خطایی کم‌تر از ۱ درصد تخمین بزند. در مسائل واقعی، وجود مجهولات متعدد نظیر سختی میان‌قاب‌ها و جرم سازه، بر پیچیدگی فرایند تخمین سختی فنرهای معادل می‌افزاید؛ با این حال بررسی‌ها بر روی یک سازه واقعی نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند مدل اجزای محدود را با دقت بالایی به سازه واقعی نزدیک سازد، به گونه‌ای که رفتار دینامیکی هر دو، تطابق چشمگیری داشته باشد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، الگوریتم معرفی شده می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد در به‌روزرسانی مدل اجزای محدود و پایش سلامت سازه‌های فولادی با اتصالات خورجینی مورد استفاده قرار گیرد.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شرکت لرزه‌نگار پارسیان بابت همکاری در تأمین تجهیزات آزمایش‌های این پژوهش، ابراز می‌دارند.

- to-column connections", International Journal of Steel Structures, 17, pp.389-411.
- [15] Moghaddam, H., and Sadrara, A. (2022), "Experimental and numerical evaluation of the mechanical characteristics of semi-rigid saddle connection", Structural Design of Tall and Special Buildings, 31, e1923.
- [16] Moghaddam, H., and Sadrara, A. (2021), "Improving the mechanical characteristics of semi-rigid saddle connections", Journal of Constructional Steel Research, 186, pp.106917.
- [17] Mostafaei, H., and Mazroi, A. (2004), "Experimental study and post-earthquake damage inspection of scissors-type (khorjini) connections for steel-frame buildings", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- [18] Amiri, H.H., and Aghakouchak, A.A. (2011), "Experimental study of cyclic behavior of conventional saddle-like connections and their acceptance criteria", Structural Steel.
- [19] Tehranizadeh, M. (2000), "Approximate parameter for semi-rigid khorjini connections in dynamic torsional response of steel structures", Engineering Structures, 22, pp.335-342.
- [20] Kazem, H., Kazem, H., Ghahremannejad, M., Vosoughi, P., Hosseini, S.F., and Ghafory-Ashtiany, M. (2020), "Investigation of seismic rehabilitation of steel buildings with semi-rigid connections", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Buildings, 173, pp.99-108.
- [21] Moussemi, M., Nezamolmolki, D., and Sani, A.A. (2016), "Free vibration analysis of a steel T-shape frame including semi-rigid khorjini connection with continuous beam", International Journal of Steel Structures, 16, pp.657-669.
- [۲۲] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۵)، "ضوابط طراحی ساختمان‌های با اتصال خورجینی"، نشریه شماره ۳۲۴، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- [23] Zayeri Baghlani Nejad, A., and Mahmoudi, M. (2021), "An investigation on the capability of proper orthogonal modes in determining the natural frequencies and damping ratios of linear structural systems", Engineering Structures, 243, pp.112691.
- [1] Karami, R.E. (1992), "Study of rigidity of khorjini connections", Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- [2] Mazroi, A. (1996), "Experimental comparison between Khorjini connections and conventional rigid connections", Second Workshop of Khorjini Connections, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.
- [3] Asgari, S.A. (1999), "Experimental study of khorjini connections", Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology.
- [4] Sadeghian, P.E. (1999), "Analytical study of khorjini connections", Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- [5] Dehghani, M. (2001), "Analytical and experimental studies of khorjini beam-to-column connections and a new detail of rigid connection", Master of Science Thesis, School of Civil Engineering, University of Tehran.
- [6] Moghadam, H. (2002), "Earthquake engineering: Fundamentals and applications", Farhang Publishing, Tehran, pp.547-582.
- [7] Amiri, H., Aghakouchak, A.A., and Shakib, H. (2004), "Performance assessment of steel braced frames with saddle connections using capacity spectrum method", Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran.
- [8] Hosseini Hashemi, B., and Hassanzadeh, M. (2008), "Study of a semi-rigid steel braced building damaged in the bam earthquake", Journal of Constructional Steel Research, 64, pp.704-721.
- [9] Mazrouei, A., Mirghaderi, M., and Dehghani, H. (2000), "Experimental and theoretical study of khorjini connection and presentation of a new rigid connection", Master of Science Thesis, University of Tehran, Iran.
- [10] Shakib, H., Dardaei Jaghan, S., Pirizadeh, M., and Moghaddasi Musavi, A. (2011), "Seismic rehabilitation of semi-rigid steel framed buildings: A case study", Journal of Constructional Steel Research, 67, pp.1042-1049.
- [11] Kiani, A., Mansouri, B., and Moghadam, A.S. (2016), "Fragility curves for typical steel frames with semi-rigid saddle connections", Journal of Constructional Steel Research, 118, pp.231-242.
- [12] Ganji Morad, S., Oghabi, M., and Tahamouli Roudsari, M. (2023), "Experimental investigation of rigid khorjini connections using reduced beam sections with diagonal and horizontal-vertical stiffeners", Structures, 57, pp.105101.
- [13] Mirghaderi, S.R., and Dehghani Renani, M. (2008), "The rigid seismic connection of continuous beams to columns", Journal of Constructional Steel Research, 64(12), pp.1516-1529.
- [14] Soleimani, E., and Behnamfar, F. (2017), "New moment-rotation equation for welded steel beam-

